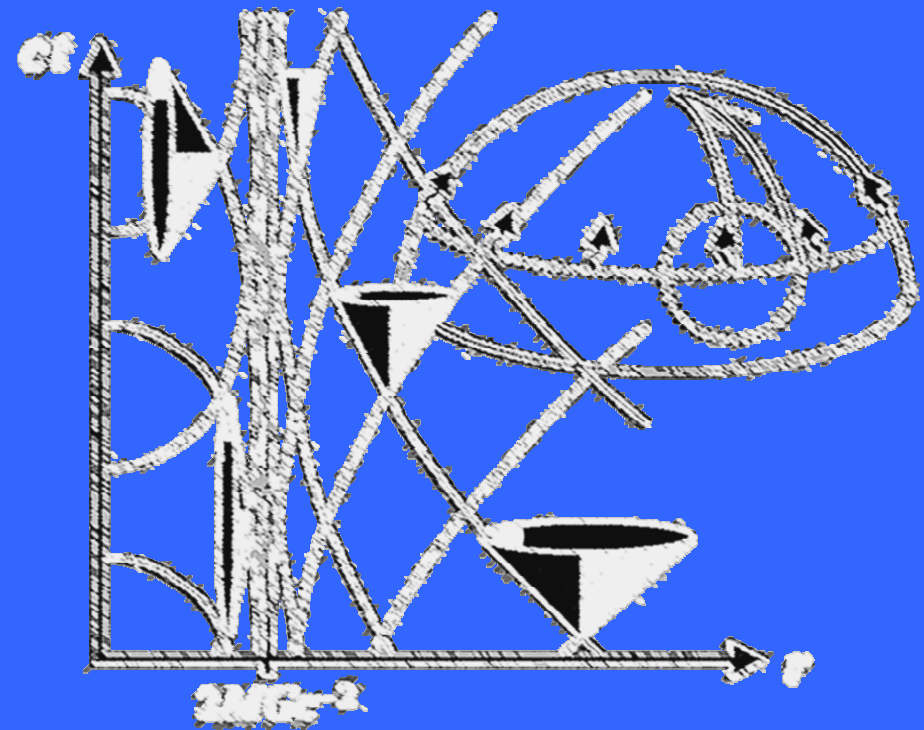
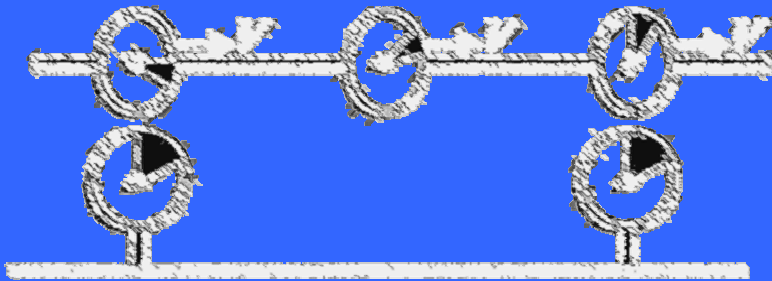


Aspectos históricos de la Relatividad Especial

Rafael Ferraro

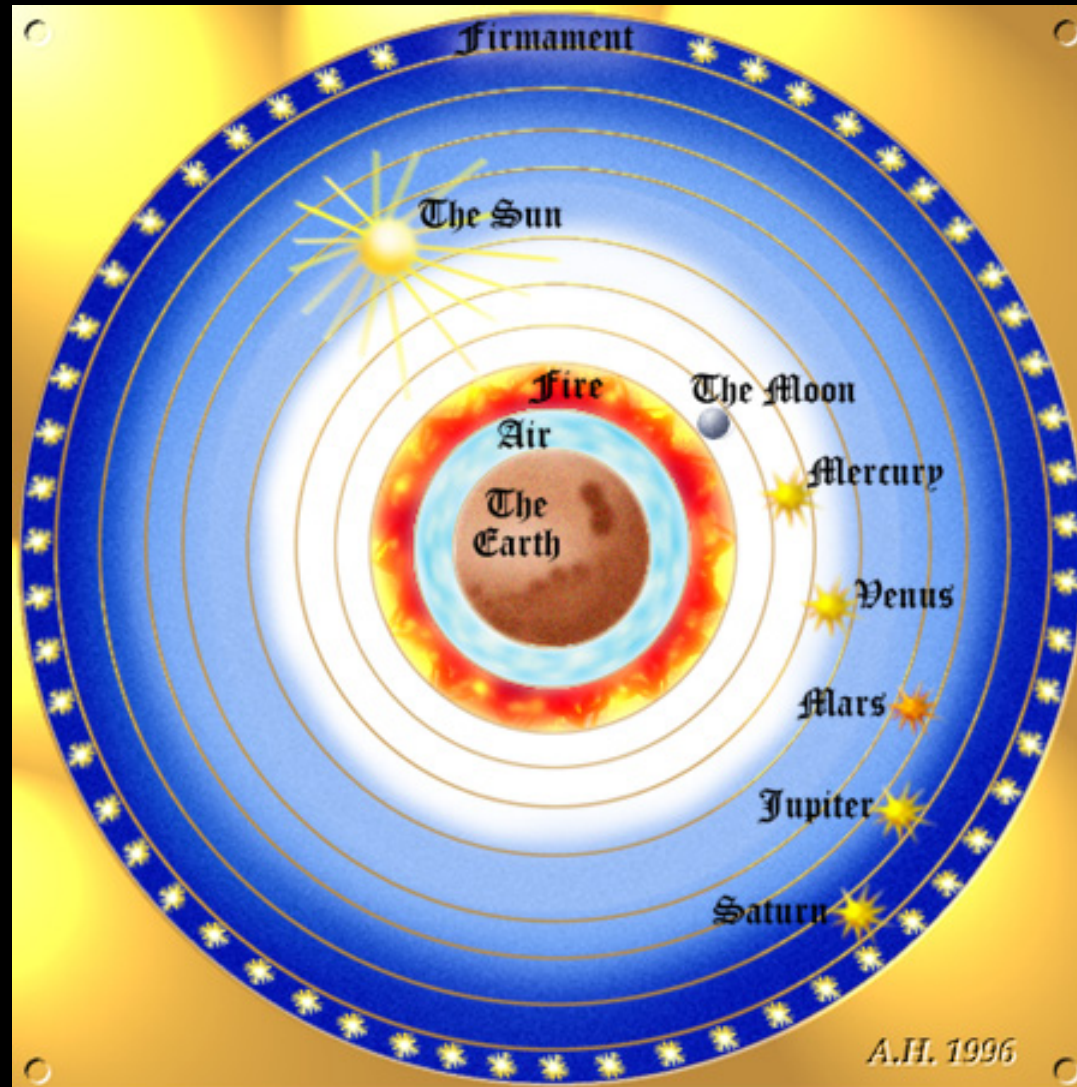


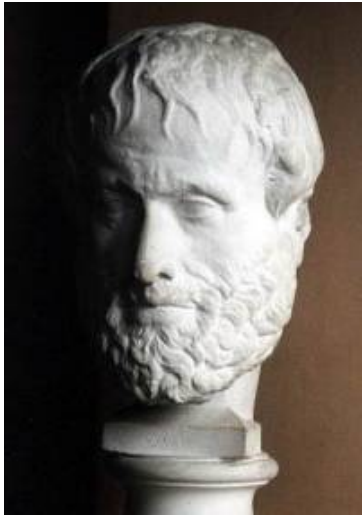
EL ESPACIO-TIEMPO

Y

LAS LEYES DE LA FÍSICA

El universo de Aristóteles

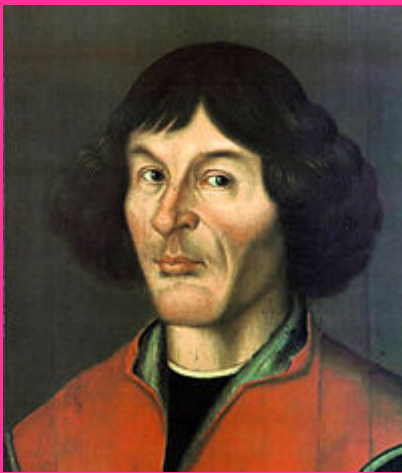




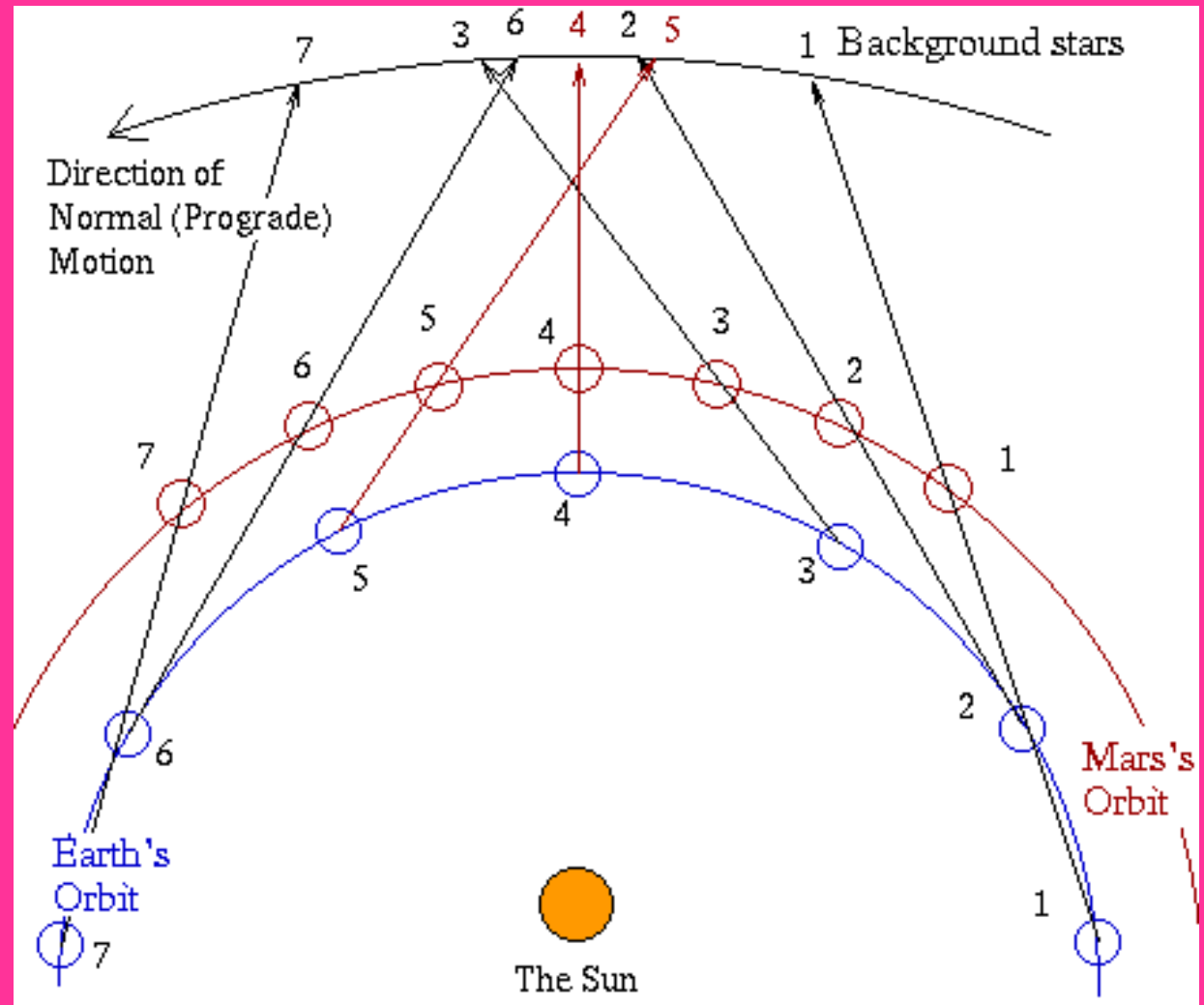
Aristóteles (384-322a.C.)

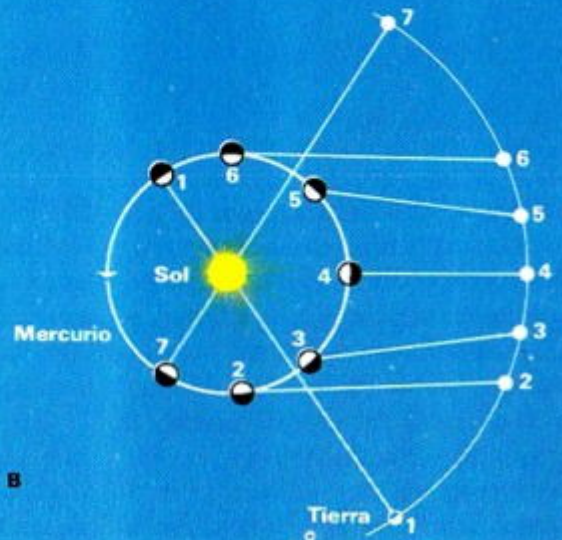
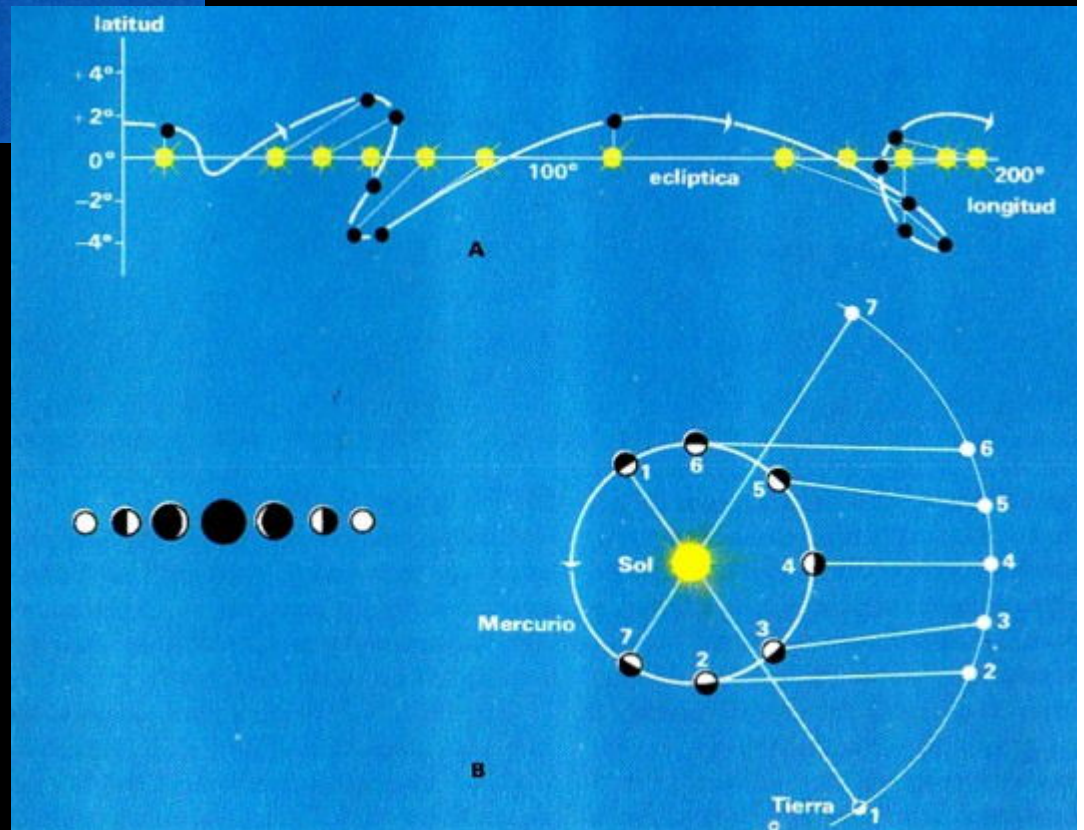
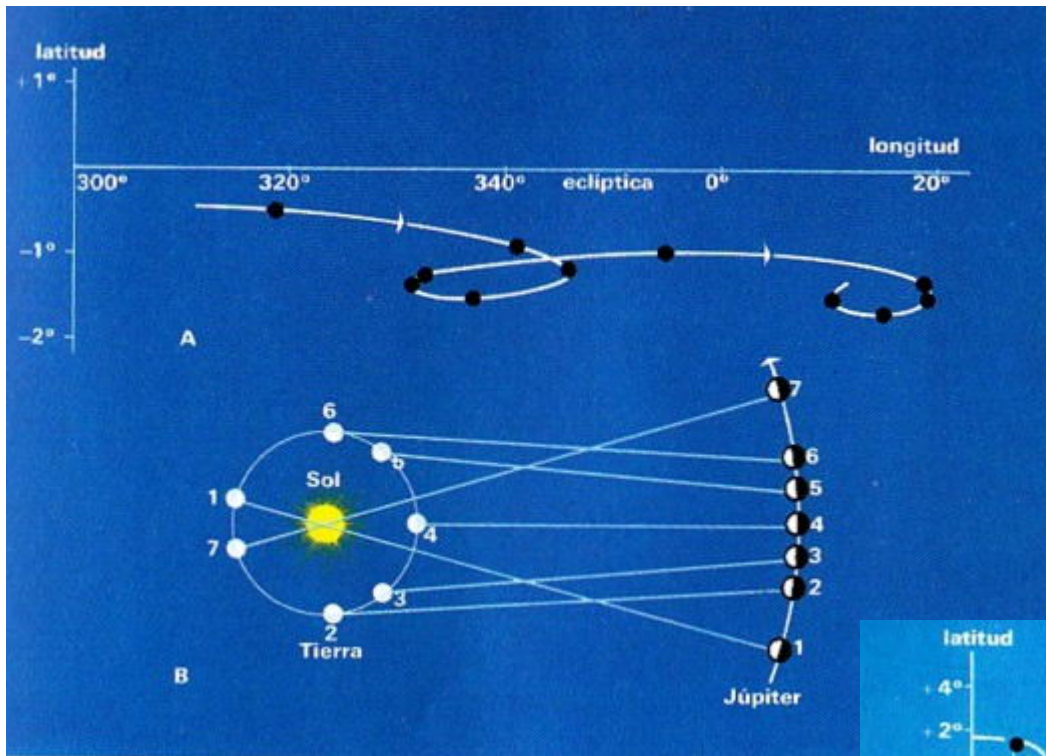
- *Los cuerpos están constituidos por cuatro elementos: tierra, agua, aire y fuego*
- *Los cuerpos constituidos por tierra y agua buscan su **lugar natural** moviéndose hacia **abajo***
- *Los cuerpos constituidos por aire y fuego buscan su lugar natural moviéndose hacia **arriba***
- *El movimiento natural culmina en el estado natural de **reposo***
- *Los movimientos **no** naturales necesitan de una fuerza para sostenerse*
- *Los cielos son regidos por otras leyes: el movimiento natural es circular.*

La influencia del pensamiento de Aristóteles se extendió hasta el Renacimiento



Copérnico (1473-1543)





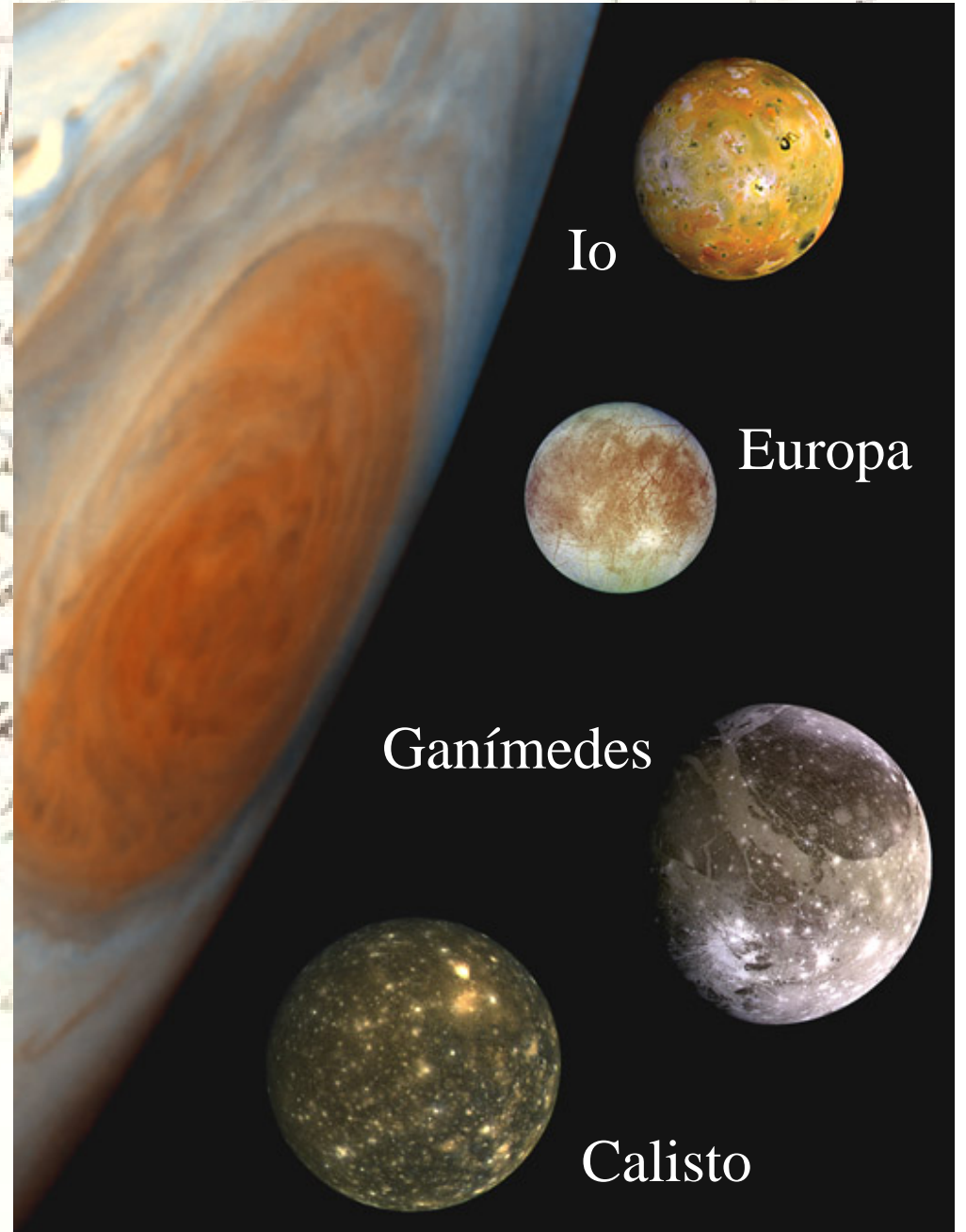
Galileo (1564-1642)



Handwritten text in Italian, likely a letter or a manuscript, discussing astronomical observations and the use of the telescope.



©IMSS-Firenze





Galileo

Si no hay un centro del universo, entonces la forma de pensar las leyes del movimiento debe cambiar sustancialmente.

- *Galileo comprendió que lo esencial del movimiento es su tendencia a perdurar*
- *El movimiento no necesita de una fuerza*
- *En la práctica los movimientos por sí solos no perduran debido a la existencia de fuerzas de rozamiento*

“...Toda velocidad, una vez impartida a un cuerpo, se conservará sin alteración mientras no existan causas externas de aceleración o retardo, ...”

Galileo, Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos ciencias nuevas (Leiden, 1638).

EL PRINCIPIO DE RELATIVIDAD: ¿ES DETECTABLE EL ESTADO DE MOVIMIENTO?

“Encerraos con un amigo en la cabina principal bajo la cubierta de un barco grande, y llevad con vosotros moscas, mariposas, y otros pequeños animales voladores... colgad una botella que se vacíe gota a gota en un amplio recipiente colocado por debajo de la misma... haced que el barco vaya con la velocidad que queráis, siempre que el movimiento sea uniforme y no haya fluctuaciones en un sentido u otro.... Las gotas caerán... en el recipiente inferior sin desviarse a la popa, aunque el barco haya avanzado mientras las gotas están en el aire... las mariposas y las moscas seguirán su vuelo por igual hacia cada lado, y no sucederá que se concentren en la popa, como si cansaran de seguir el curso del barco...”

Galileo, *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos ciencias nuevas* (Leiden, 1638).

Los fenómenos mecánicos no revelan el estado de movimiento del laboratorio, como verificamos a diario en trenes, barcos y aviones.

Esto significa que las leyes de la Mecánica son válidas en cualquier *laboratorio inercial* .

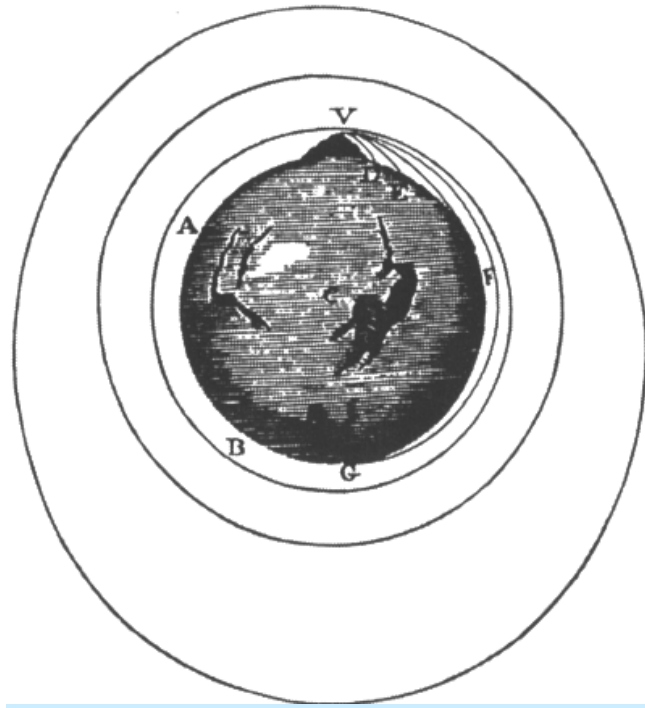
(Los cambios de estado de movimiento son detectables: cuando el tren toma una curva o salta al atravesar la unión de dos tramos de vía, cuando frena o cuando acelera.)

Principio de relatividad

En Física, la equivalencia entre *laboratorios inerciales* tiene rango de Principio:

Principio de relatividad

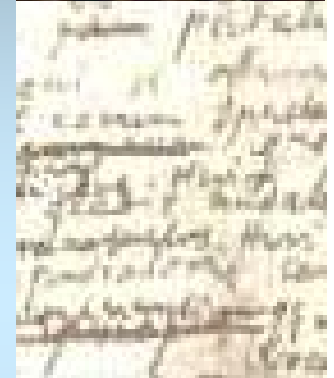
En todos los laboratorios inerciales se verifican las mismas leyes fundamentales de la Física.



Newton (1642-1727)

-Las mismas leyes de la Física gobiernan los cielos y la tierra

*-Eleva la perdurabilidad del movimiento a la categoría de **Primera Ley de la Dinámica:***



Principio de inercia

“Todo cuerpo persevera en su estado de reposo o de movimiento uniforme en línea recta, a menos que se ejerzan fuerzas sobre él que lo obliguen a cambiar ese estado.”

I. Newton, Principia, Libro I (Londres, 1687).

PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICÆ.

Autore J. S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos
Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPY S, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,
Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostant Venales
apud Sam. Smith ad insignia Principis Walliæ in Coemeterio
D. Pauli, aliisque nonnullis Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

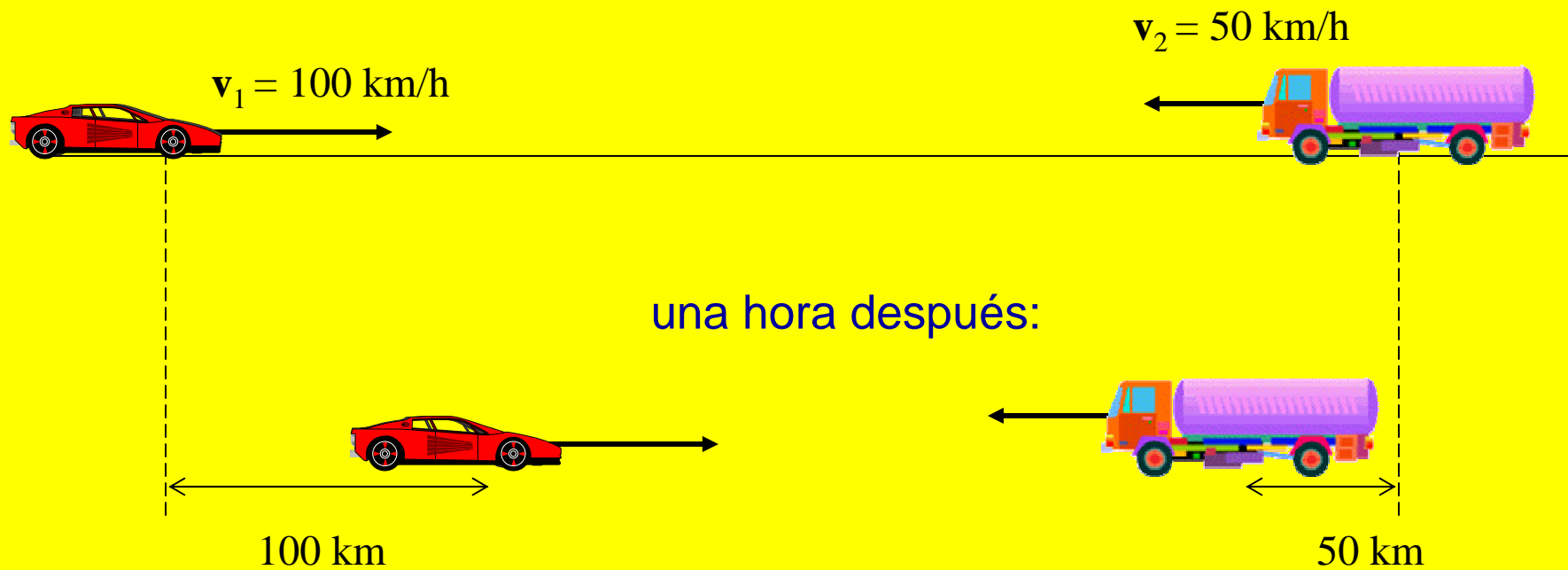
Segunda Ley de Newton:

$$\mathbf{F} = m \mathbf{a}$$

¿Cómo se realiza el Principio de Relatividad en la Segunda Ley de Newton?

El cumplimiento o no del principio de relatividad depende de los atributos que otorguemos al espacio y el tiempo.

UNA CUESTIÓN SOBRE LA NATURALEZA DEL ESPACIO Y EL TIEMPO: LA ADICIÓN DE VELOCIDADES

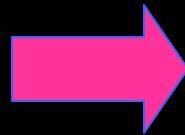


La distancia entre ambos vehículos, medida en tierra,
se acorta 150 km cada hora

Instalemos un laboratorio a bordo del automóvil.

¿Cuál será la velocidad del camión medida en este nuevo laboratorio?

distancias y
tiempos
invariantes



velocidad del camión
relativa al automóvil
150 km/h

$150 \text{ km/h} = v_1 + v_2$ Teorema de adición de velocidades

La Física newtoniana está construida sobre la base de que las distancias y tiempos son independientes del laboratorio en donde se midan (**INVARIANCIA**). Esta hipótesis sobre la naturaleza de distancias y tiempos está avalada por nuestra experiencia cotidiana.

aceleración:

$$\mathbf{a} = \frac{\text{cambio de velocidad}}{\text{tiempo}}$$

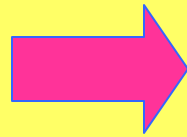
invariante!

La Segunda Ley de Newton es consistente con el Principio de relatividad porque la aceleración tiene el mismo valor en todo laboratorio inercial (si las distancias y tiempos son invariantes)

Por otro lado, la fuerza es invariante porque depende de distancias u otros invariantes.

La Segunda Ley de Newton iguala dos invariantes: $F = ma$.

**distancias y
tiempos
invariantes**



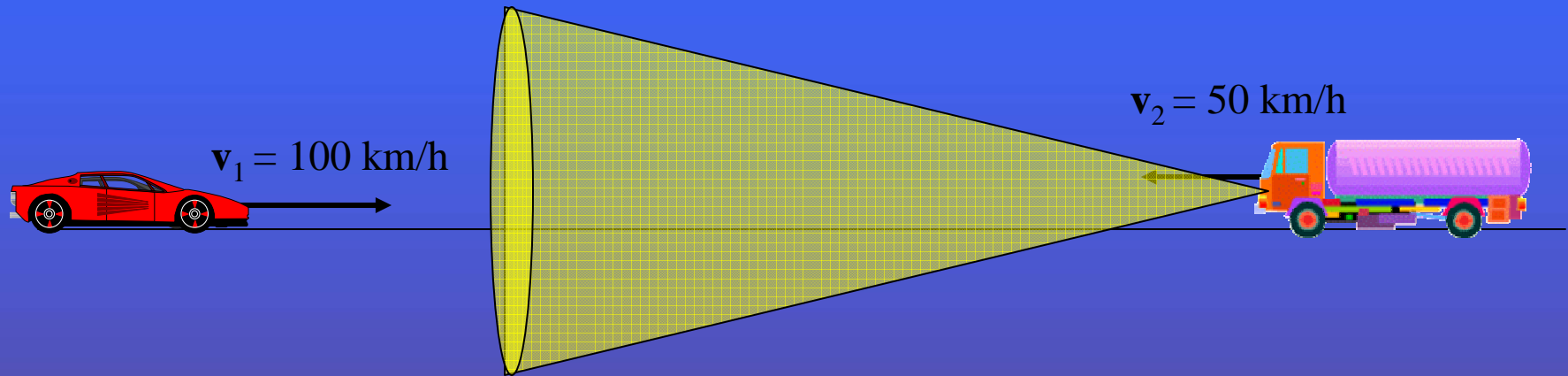
-las velocidades se suman

**-las aceleraciones son
invariantes**

¿Debemos confiar en nuestra intuición acerca de la invariancia de distancias y tiempos?

¿Será válido el teorema de adición a todas las escalas de velocidades?

¿O sólo se trata de buenas aproximaciones para el rango de velocidades cotidianas?



¿Vale la adición de velocidades cuando se involucran velocidades muy grandes como la **velocidad de la luz**?

(Esto equivale a preguntar si la **invariancia** de distancias y tiempos es una noción adecuada a grandes velocidades)

O.T. R.U. A.T.O
most general form
from T & T and
in 6 lines. How



was done in the
new lagged E & S of
value of $(\frac{100}{100})^2$ S
($\frac{100}{100}$) S

Maxwell
(1831-1879)

¿Qué es la luz?

La luz es una onda electromagnética

-De las leyes de Maxwell (1873) se deduce que las ondas electromagnéticas se propagan con velocidad

$$c = 299.792,458 \text{ km/s}$$

Como las velocidades no son invariantes en Física Clásica, las leyes de Maxwell no podrían ser válidas en cualquier laboratorio inercial.

¡Las leyes de Maxwell no se encuadrarían dentro del Principio de Relatividad!

Según los científicos del siglo XIX, las leyes de Maxwell sólo podían utilizarse en un laboratorio fijo al “éter”.

Esta postura sería admisible si el éter realmente existiese.

¿Existe el éter?

*¿Qué es el éter?: para los físicos del siglo XIX, el **éter** era un medio material necesario para que la luz se propague.*

¿Dónde se encuentra el éter?: En todo lugar donde ocurra un fenómeno electromagnético. Como la luz se propaga por doquier, el éter debería llenar todo el espacio.

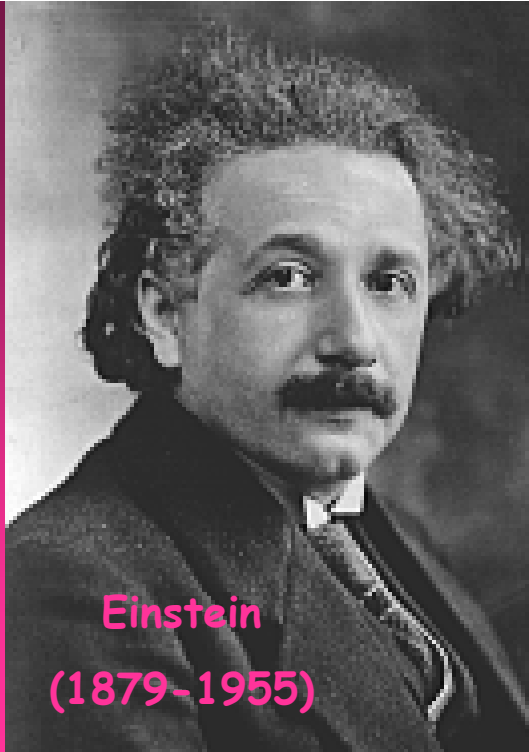
En el siglo XIX las leyes de Maxwell no tenían el status de las leyes de Newton, porque su validez se restringía al laboratorio fijo al éter mientras que las leyes de Newton podían aplicarse en cualquier laboratorio inercial.

¿Podría detectarse el estado de movimiento de un laboratorio mediante fenómenos electromagnéticos?

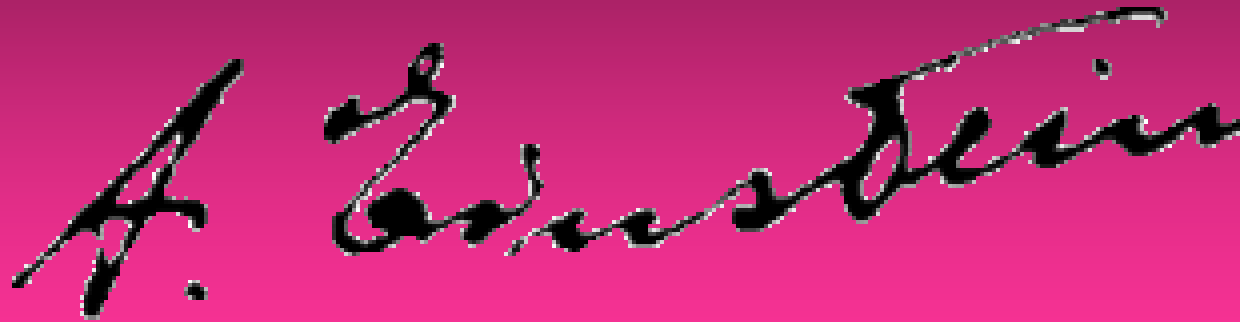
Sí, midiendo la velocidad de la luz en el laboratorio. El teorema de adición de velocidades permitiría deducir la velocidad de nuestro laboratorio (la Tierra) respecto del éter. Esto sería una forma indirecta de verificar la existencia del éter.

Sin embargo, los experimentos fracasaron en detectar el movimiento de la Tierra respecto del éter (Michelson-Morley, 1887). La luz parecía propagarse con una única velocidad **C** en cualquier circunstancia. **La velocidad de la luz parecía ser invariante.**

RELATIVIDAD ESPECIAL (1905)



Einstein
(1879-1955)

A handwritten signature of Albert Einstein in black ink, written in a cursive style. The signature is 'A. Einstein'.

● **El éter no existe:** las ondas electromagnéticas no son ondas de materia. El campo electromagnético tiene entidad propia y no precisa una “materialización”

● **El estado de movimiento no es detectable** por medio de fenómenos electromagnéticos: La teoría de Maxwell tiene que integrar el conjunto de leyes fundamentales de la Física que obedecen el Principio de relatividad.

● El uso de las leyes de Maxwell en cualquier laboratorio inercial implica que la velocidad de la luz tiene el mismo valor en cualquier laboratorio inercial

$$c = 299.792,458 \text{ km/s}$$

Si la velocidad de la luz es la misma en distintos laboratorios entonces el teorema de adición de velocidades galileano no expresa correctamente la transformación de la velocidad ante cambios de laboratorio:

Las **nociones intuitivas de espacio y tiempo** (esto es, que las distancias y los tiempos no cambian al cambiar de laboratorio) deben ser sometidas a una **revisión** para que se subordinen a la invariancia de la velocidad de la luz.

Si las nociones de espacio y tiempo son modificadas habrá que revisar también la Mecánica newtoniana, construida sobre la base de nuestras nociones intuitivas de espacio y tiempo.

¿Cómo proceder sin
preconcepciones sobre la
naturaleza del espacio y el
tiempo?

LABORATORIO PROPIO DE LA BARRA



$$L_o = V \Delta t$$

L_o : longitud propia de la barra

LABORATORIO PROPIO DE LA PARTÍCULA



$$L = V \Delta T$$

ΔT : tiempo propio entre los eventos

$$\frac{L_o}{L} = \frac{\Delta t}{\Delta T}$$

La relación entre la longitud L y la longitud propia L_o sólo puede depender de la velocidad V (lo mismo para la relación entre los tiempos):

$$\frac{L_o}{L} = f(V), \quad \frac{\Delta t}{\Delta T} = f(V)$$

¿Cuál es el valor de $f(v)$?

En Física Clásica: $f(v) = 1$

Según Einstein (1905):

el valor de $f(v)$ debe subordinarse a la invariancia de la velocidad de la luz.

$$f(V) = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

$$L_V = L_0 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}},$$

$$\Delta t_V = \frac{\Delta T}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

contracción de longitudes

dilatación de tiempos

A. Einstein

¿POR QUÉ NO PERCIBIMOS LA CONTRACCIÓN DE LONGITUDES Y LA DILATACIÓN DEL TIEMPO?

velocidad V

efecto sobre longitudes y tiempos

30 km/seg

0,0000005 %

3000 km/seg

0,005 %

150.000 km/seg

13,4 %

ADICIÓN DE VELOCIDADES RELATIVISTA

Adición relativista de velocidades:

$$v_{21} = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}$$

Aún si v_1 y v_2 fueran un 10% de la velocidad de la luz la velocidad v_{21} se apartaría tan sólo un 1% del resultado galileano

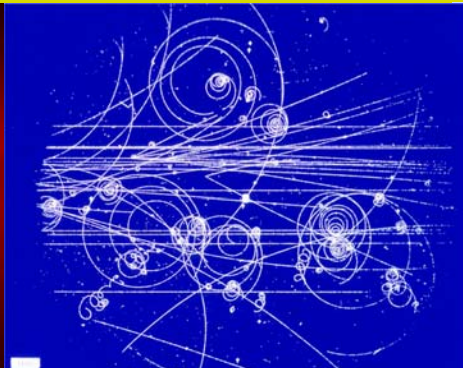
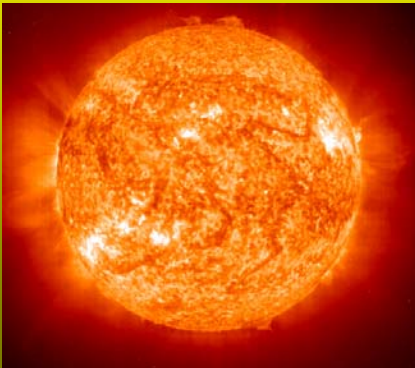
A. Einstein

RESULTADOS DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL

Equivalencia masa-energía:

$$E = M c^2$$

A. Einstein



¿Qué es la gravedad?

Newton: *una fuerza de atracción entre cuerpos*

Einstein (1915): *un fenómeno de curvatura del espacio-tiempo producida por la materia y la energía contenidas en él*